DOI:10.11931/guihaia.gxzw202302048

2000—2020 年广西植被生态质量变化及驱动力分析

莫建飞 [1,2]，周希源 [3]，莫伟华 [1,2*]，陈燕丽 [1,2]

（1. 广西壮族自治区气象科学研究所，南宁 530022；2. 广西壮族自治区生态气象和卫星遥感中心，南宁 530022；3. 桂林市气象局，广西 桂林 541001）

摘　要：为掌握广西植被生态质量的时空变化特征及其驱动机制，以植被生态质量指数（ecological quality index，EQI）为评价指标，基于气象、地形、土壤和遥感等多源数据，利用线性趋势分析、相关性分析、地理探测器等方法，分析了 2000—2020 年广西植被生态质量的时空变化特征及其驱动力。结果表明：（1）2000 年以来广西植被生态质量指数呈显著增加趋势，区域植被生态明显改善。植被生态质量发展经历了缓慢增长、迅速增长、显著提升等演变阶段。在空间上，广西植被生态质量指数呈现四周高，中间低的特征，高值区逐渐由东部向西部、北部扩展。（2）广西植被生态质量时空演变影响因素差异显著。随海拔高度上升植被生态质量总体变化呈"增加—下降—稳定—上下波动"的趋势。壤土的植被生态质量高，砂土的植被生态质量低。森林和灌草的生态质量较高,农田植被的生态质量较低。植被生态质量与气候驱动因素呈显著正相关关系，受气温、降水共同影响，其中以气温为主要驱动（T）的区域面积最广，降水为主要驱动（P）的区域面积次之，气温降水强驱动（$[T+P]^+$）和弱驱动（$[T+P]^-$）的区域面积较小。（3）广西植被生态质量变化驱动力受地形、土壤、植被、气候、自然灾害和人类活动的共同影响。自然影响因子解释力排序为植被＞地形＞土壤＞气候，其中植被净初级生产力和植被覆盖度是影响植被生态质量时空分异的最主要因素。自然因子对广西植被生态质量变化的影响存在交互作用，均呈非线性增强及双因子增强关系，其中地形与植被、土壤与植被、气候与植被因子交互作用最明显。自然灾害、人类活动加剧了植被生态质量变化的影响，其中干旱、低温冷害等气象灾害抑制了植被生态质量的改善，而林业生态工程等人为活动促进了植被生态质量的提升。该研究结果为合理制定广西植被生态保护与修复措施提供了科学理论依据和技术支撑。

关键词：植被生态质量，时空演变，驱动力，遥感，广西

中图分类号：Q948; P49　　**文献标志码：**A

Analysis of vegetation ecological quality change and its driving forces in Guangxi from 2000 to 2020

Mo Jianfei[1,2], Zhou Xiyuan[3], Mo Weihua[1,2*], Chen Yanli[1,2]

（1. *Guangxi institute of meteorological sciences*, Nanning 530022, China；2. *Guangxi Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center*, Nanning 530022, China；3. *Guilin Meteorological Bureau*, Guilin 541001, Guangxi, China）

Abstract: In order to grasp the spatial temporal variation characteristics and driving mechanism of vegetation ecological quality in Guangxi, based on multi-source data such as meteorology, terrain, soil and remote sensing, and using the ecological quality index (EQI) as an evaluation indicator, linear trend analysis, correlation analysis and geographical detector method were used to analyze the spatiotemporal changes and driving mechanisms from 2000 to 2020. The results were as follows: (1) Since 2000, the vegetation ecological quality index of Guangxi has significantly increased, and the regional vegetation ecology has improved significantly.The development of vegetation ecological quality has experienced stages of slow growth, rapid growth and significant improvement.

基金项目：广西重点研发计划项目(桂科 AB23026052；桂科 AB21238010)；广西气象局重点项目（桂气科 2023Z03）。

第一作者：莫建飞（1978-），硕士，高级工程师，主要从事生态遥感与 GIS 应用研究，(E-mail)mojfei@163.com。

[*]**通信作者：**莫伟华，硕士，正高级工程师，主要从事生态气象监测评估与应用研究，(E-mail)mwh-0419.@163.com。

In terms of space, the vegetation ecological quality index in Guangxi shows a characteristic of high in four directions and low in the middle, with the high-value areas gradually expanding from the east to the west and north.(2) The influencing factors of spatial and temporal evolution of vegetation ecological quality in Guangxi were significantly different.The overall change of vegetation ecological quality at different altitudes showed a trend of 'increase-decrease-stability-fluctuation'. The vegetation ecological quality in different soil types is high in loam soil and low in sandy soil. The ecological quality of forest and shrub-grass is high, and the ecological quality of farmland vegetation is low. There is a significant positive correlation between vegetation ecological quality and climate driving factors, which is affected by both temperature and precipitation.The area mainly driven by temperature (T) is the widest, followed by the area mainly driven by precipitation (P). The areas driven strongly ($[T+P]^+$) and weakly ($[T+P]^-$) by temperature and precipitation are smaller.(3) The driving force of changes in vegetation ecological quality change of Guangxi was affected by terrain, soil, vegetation, climate, natural disasters and human activities. The order of explanatory power of natural influencing factors was vegetation > terrain > soil > climate, in which the vegetation net primary productivity and vegetation coverage were the most important factors affecting the spatiotemporal differentiation of vegetation ecological quality. The effects of natural factors on vegetation ecological quality in Guangxi was interactive, showing a nonlinear enhancement and two-factor enhancement relationship, and the interaction between terrain and vegetation, soil and vegetation, and climate and vegetation were the most obvious. Natural disasters and human activities aggravated the impact of vegetation ecological quality change. Among them, meteorological disasters such as drought and low temperature damage inhibited the improvement of vegetation ecological quality, while human activities such as forestry ecological engineering promoted the improvement of vegetation ecological quality. The research results provided scientific theoretical basis and technical support for making reasonable measures of vegetation ecological protection and restoration in Guangxi.
Key word: vegetation ecological quality, temporal and spatial variation, driving force, remote sensing, Guangxi

植被是生态系统的重要组成部分，在反映区域生态环境质量及其变化方面充当“指示器”的作用。植被变化及其驱动力一直是国内外生态学领域研究的热点问题（金凯等，2020）。广西位于中国南部，地势呈西北向东南倾斜状，地形错综复杂，喀斯特地貌发育典型、分布广泛，石漠化严重，是我国生态脆弱地区之一（陈燕丽等，2019），也是生态文明建设和生态扶贫的重点关注区域。近年来社会经济的快速发展，人类活动加强，使广西植被生态变化十分复杂。开展长时间序列的广西植被变化综合监测及其驱动力研究，对掌握植被生态演变驱动机制，维护区域生态安全具有十分重要的作用。

归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）和植被净初级生产力（net primary productivity，NPP）在表征植被状况方面具有优势，其中，NDVI能很好地反映植被覆盖、生物量及生态系统参数的变化（赵英时，2003），已被广泛用于植被变化及其驱动力研究，NPP则是评估生态系统功能以及生态环境质量的有效指标（刘刚等，2017；王芳等，2018）。以NDVI为指标，韦振锋等（2013）研究发现1999—2010年（11年）广西NDVI增加趋势显著，且桂南和桂西北地区NDVI增幅较大，植被对降水响应的敏感性强于气温。廖春贵等（2018）研究表明2007—2016年（10年）广西植被NDVI增加，NDVI与降水、气温的负偏相关区域面积大于正偏相关。相似研究表明（张敏等，2019），2006—2016年（11年）广西植被NDVI波动性明显，温度和降水与植被覆盖呈正相关关系，人工造林是广西NDVI上升的主要原因。更长时间遥感序列的研究显示，2000—2018年（19年）广西植被NDVI呈增加趋势，在不同地形条件下NDVI变化不同，高程增加，植被NDVI先增加再减少，坡度增加，植被NDVI呈先增加至稳定再减小；气温和降水对植被NDVI为正影响（杨艳萍等，2021）。以NPP为指标，周爱萍等（2014）研究表明，2001—2010年（10年）广西植被NPP显著下降，NPP与气温和降水显著相关，坡度、经度、地貌特征、纬度和降水是影响NPP空间格局的主要因素；相近时段的研究表明，2000—2011年（12年）广西NPP总体呈增加趋势，NPP与降水显著正相关，而与温度相关性不显著，海拔越大，植被NPP越高，人类活动是影响NPP变化的主要因素（李燕丽等，2014）；更长时间段的研究表明，2000—2015年（16年）广西植被NPP波动下降，植被NPP对气温降水变化响应不显著，不同土壤类型条件下植被NPP变化趋势差异较大，其中红壤、石灰

土、粗骨土地区的植被NPP下降，而砖红壤地区的植被NPP增加，随着海拔高度的上升，植被NPP呈“增加—下降—增加—下降”变化（熊小菊等，2019）。综上所述，采用单一遥感监测指标研究表明，2000年以来广西植被NDVI（廖春贵等，2018；张敏等，2019；杨艳萍等，2021；徐勇等，2023）和植被覆盖度（何鑫茹，2018；黄冬梅等，2022；李同艳，2019）显著增加，但植被NPP显著下降（周爱萍等，2014；荣检等，2017；熊小菊等，2019）。可见，广西植被变化特征及其驱动力受数据时间序列、遥感监测指标等的影响，研究结果存在较大的差异，具有局限性。植被生态质量是植被地理分布、生产力和生态服务的综合体现（汲玉河等，2021）。NDVI和NPP只能反映陆地生态系统服务功能或植被生态质量的一个方面（钱拴等，2020），因此，采用单一遥感监测指标评价植被生态质量变化及其驱动影响因素，结果都可能不够全面。

植被生态质量指数（ecological quality index，EQI）同时考虑了植被覆盖度和植被NPP两个指标，可反映植被在单位面积上覆盖状况和生产能力的综合能力，较大程度地解决了因采用NDVI、植被覆盖度、NPP等单一遥感指标而导致植被生态质量监测结果差异问题，已被证实适用于全国植被生态质量监测评价（钱拴等，2020）。EQI可较好反映植被时空变化特征（曹云等，2022；戴芳筠等，2022；韩静等，2022），但在驱动力研究方面，现有研究主要集中在气温和降水等气象因子对植被生态质量的影响方面，植被、地形、土壤因素等的影响涉及较少，针对广西地区，尚未见利用以EQI为指标进行植被生态质量变化及其驱动力研究的报道。本研究以广西植被为研究对象，基于2000—2020年MODIS NDVI遥感资料和逐日气象数据，以EQI为评价指标，采用线性趋势分析、相关性分析、地理探测器等方法，通过分析21a广西植被生态质量的时空变化特征及其影响因素，拟探讨：（1）分析广西复杂多变的植被生态变化特征；（2）探索广西植被生态演变的驱动机制；（3）为合理开发利用与保护广西植物资源、推动广西生态绿色发展提供科学理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

广西位于中国华南地区，分布于104°26′—112°04′ E、20°54′—26°24′ N之间，北部接南岭山地，南部临北部湾，西北部处于第二阶梯中的云贵高原东南边缘，属云贵高原向东南沿海丘陵过渡地带。地势由桂西、桂西北、桂东北部逐步向桂中、桂东南倾斜。地形四周高中部低，形似盆地。地貌总体呈现山地连绵、丘陵起伏、平原狭小、河流众多、岩溶广布等特征。气候类型属中亚热带季风气候和南亚热带季风气候，雨热同期，降水量时空分布不均，夏季时间长、气温高、降水多，冬季时间短、天气干暖（广西壮族自治区气候中心编著，2007）。受西南暖湿气流和北方变性冷气团的交替影响，干旱、暴雨洪涝、低温冷（冻）害等气象灾害发生频繁。植被类型多样，包括针叶林、阔叶林、灌丛、草丛、农田栽培植被等。针叶林、阔叶林主要分布在桂西北、桂东南山地地区，灌草多分布在岩溶石山区，农田栽培植被广泛种植于广西盆地中的平原、台地和丘陵地区。土壤类型丰富，包括红壤、黄壤、黄棕壤、紫色土、石灰岩土、水稻土、潮土等。其中石灰岩土主要分布于喀斯特地区，水稻土主要分布在平原和三角洲及盆地、山间谷地地区。

1.2 数据源及处理

研究数据主要包括植被生态参数、气象、地形、土壤、基础地理信息等资料，栅格数据统一空间分辨率为 250 m × 250 m、投影方式为 CGCS2000 _GK_Zone_18。

1.2.1 植被生态参数数据

利用 NASA 提供的 MOD13Q1 级植被指数产品，采用最大值合成法（maximum value composition，MVC），合成为月尺度的 NDVI 数据，采用三次样条插值法（Spline），处理云污染像元，重构高质量 NDVI 数据序列。利用像元线性分解模型（苏文豪等，2018），计算 2000—2020 年广西植被覆盖度（fractional vegetation cover，FVC）。基于植被光能利用原理（Yan et al.，2015），利用重构高质量 NDVI 数据、结合地面气象观测资料，估算 2000—2020 年广西植被净初级生产力（net primary productivity，NPP），计算公式如下：

$$NPP_{ij} = GPP_{ij} - R_{ij} \tag{1}$$

$$GPP_{ij} = \varepsilon_{ij} \times FPAR \times PAR_{ij} \tag{2}$$

式中：NPP_{ij}、GPP_{ij}、R_{ij}分别为第 i 年第 j 月的植被净初级生产力、总初级生产力和呼吸消耗量（gC·m^{-2}月$^{-1}$）；ε_{ij}为第 i 年第 j 月的实际光能利用率；$FPAR$ 为植被吸收光合有效辐射的比例，是随植被生长而变化的量，本文利用逐月 $NDVI$ 估测逐月 $FPAR$。PAR_{ij}为第 i 年第 j 月的入射光合有效辐射(MJ·m^{-2}·月$^{-1}$)，采用世界粮农组织推荐的方法由全国气象站日照时数计算太阳总辐射，然后根据入射光合有效辐射占太阳总辐射的比例 0.48 计算 PAR_{ij}。

1.2.2 气象数据

气象数据来源于广西气象信息中心，选取 2000—2020 年广西境内 92 个气象站点的逐日平均气温、降水等数据，计算其月值、年值，采用反距离权重法插值生成 250 m × 250 m 的气象要素栅格数据。

1.2.3 地形数据

地形数据为分辨率 30 m 的广西数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据，来源于地理空间数据云，经几何校正、拼接、镶嵌、裁剪和投影变换处理获得广西海拔高度、坡度等地形数据。

1.2.4 土壤数据

土壤数据主要包括土壤类型数据和土壤质地数据，来源于世界土壤数据库（harmonized world soil database，HWSD），经裁剪和投影变换处理获得广西土壤类型、土壤质地数据。

1.2.5 植被类型

基于 Landsat TM/ETM/OLI 卫星遥感数据，参照不同植被的光谱特征，确定不同植被的遥感分类特征参数，采用最大似然法（孙家抦，2003）、决策树分层等提取方法，获取 2000、2005、2010、2015、2020 年广西森林、灌草、农田植被类型信息数据。

1.3 方法

1.3.1 植被生态质量评价方法

基于植被净初级生产力和植被覆盖度，采用权重加权法构建植被生态质量指数，作为评价指标，定量反映 2000—2020 年广西植被生态质量变化特征。植被生态质量指数计算公式如下（钱栓等，2020）：

$$Q_i = 100(f_1 \times \frac{NPP_i}{NPP_{\mathrm{m}}} + f_2 \times FVC_i) \tag{3}$$

式中：Q_i为第 i 年植被综合生态质量指数；FVC_i为第 i 年平均植被覆盖度，由全年 12 个月植被覆盖度取平均值获得；NPP_i为第 i 年植被净初级生产力，由全年 12 个月累加值获得；NPP_m为某时段年植被 NPP 的历史最高值，即空间区域范围内相应时段最好气候条件下的年植被 NPP；f_1、f_2分别为权重系数（f_1=0.5，f_2=0.5）。

1.3.2 植被动态变化度计算方法

采用时空变化模型，计算广西植被动态变化度，公式如下（毕宝德，2006）：

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{4}$$

式中：K 为植被动态度（%）；U_a和 U_b代表研究初期和末期的植被面积（km^2）；T 为研究时段长（a）。

1.3.3 趋势分析法

采用一元线性回归方法，对 2000—2020 年广西植被生态质量指数变化趋势进行时间序列分析，以趋势率表示植被生态质量指数在该时间段内的增加或减少的速率。趋势率计算公式如下（张月丛等，2008）：

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times Q_i - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)\left[\sum_{i=1}^{n} Q_i\right]}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left[\sum_{i=1}^{n} i\right]^2} \tag{5}$$

式中：θ_{slope}为趋势率；Q_i为第 i 年的年植被生态质量指数；n 为要评价的年限。$\theta_{slope}>0$ 表示在某段时间研究区域植被生态质量为增加趋势，植被生态改善；反之区域植被生态质量为减少趋势，植被退化。

1.3.4 相关分析法

利用 GIS 技术和相关分析法，分析广西植被生态质量变化与地形、土壤、气候条件的相关性。将植被生态质量指数空间分布图与地形高程图、坡度图相对应，高程以 10 m 为步长、坡度以 1°为步长，分别统计每 10 m 高程、1°坡度区间内 2000—2020 年不同时段广西植被生态质量指数的平均值，分析地形条件对植被生态质量影响。同样将植被生态质量指数空间分布图与土壤类型图、土壤质地图、植被类型图相对应，统计每类土壤类型、土壤质地类型、植被类型的 2000—2020 年不同时段广西植被生态质量指数的平均值，分析土壤、植被类型对植被生态质量影响。基于 2000—2020 年广西年平均植被生态质量指数与同期气温、降水量数据，利用偏相关和复相关分析法（穆少杰等，2012），分别计算基于像元尺度的广西植被生态质量年际变化与各气候因子的相关系数，并采用 T 和 F 检验法分别对偏相关系数和复相关系数的显著性进行检验。参考相关研究成果（曹磊等，2014），相关系数通过 0.05 水平的显著性检验，则认为其相关性达到显著水平；相关系数通过化 0.01 水平的显著性检验，则认为其相关性达到极显著水平，以此分析气候条件对植被生态质量变化的响应。

1.3.5 驱动力分析法

地理探测器是探测要素的空间分异性，并揭示其背后驱动力的统计学方法（王劲峰等，2017）。其核心思想：假设某个自变量对某个因变量有重要影响，那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性。其解释力用 q 值度量，公式如下（Wang et al., 2010）：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{6}$$

式中：h=1，2…，L 为因变量（Y）和自变量（X）的分层；N_h 和 N 分别为层 h 内和区域内的单元数；σ_h^2 和 σ^2 是层 h 和全区的 Y 值的方差。地理探测器 q 统计量的值域为[0，1]，q 值越大说明因变量的空间分异性越明显，各项自变量因子对因变量的解释力越强。

利用王劲峰等（2017）提出的数据离散化方法，将植被生态质量变化因变量和自变量进行离散化处理，利用因子分析和交互探测，计算各自然因素对植被生态质量变化的影响力 q 及其相互作用关系，分析植被生态质量变化的驱动力。

2 结果与分析

2.1 广西植被生态质量时空变化特征分析

2.1.1 时间变化特征

2000—2020 年广西年植被生态质量指数在时间上呈现波动式增加趋势，植被生态改善明显（图 1）。2000—2020 广西年平均植被生态质量指数为 50～80，趋势率达到 6.3/10 a（P<0.05）。2005 年最低（62.72），2017 年最高（77.75）。2000—2005 年、2006—2010 年、2011—2015 年、2016—2020 年 4 个时段广西年均植被生态质量指数分别为 66.29、68.40、71.45、76.82。表明广西年平均植被生态质量指数逐步增加，但 2006—2010 时段平均植被生态质量指数增长稍偏慢，可能与 2006—2010 时段严重少雨干旱、低温寒冻灾害频发相关。2011—2015 时段开始跳跃式增长，尤其从 2013 年开始呈现明显上升趋势；2016—2020 时段较 2000—2005 时段的广西年均植被生态质量指数提高了 14.62%，生态环境总体提升显著，植被生态呈现好转态势。

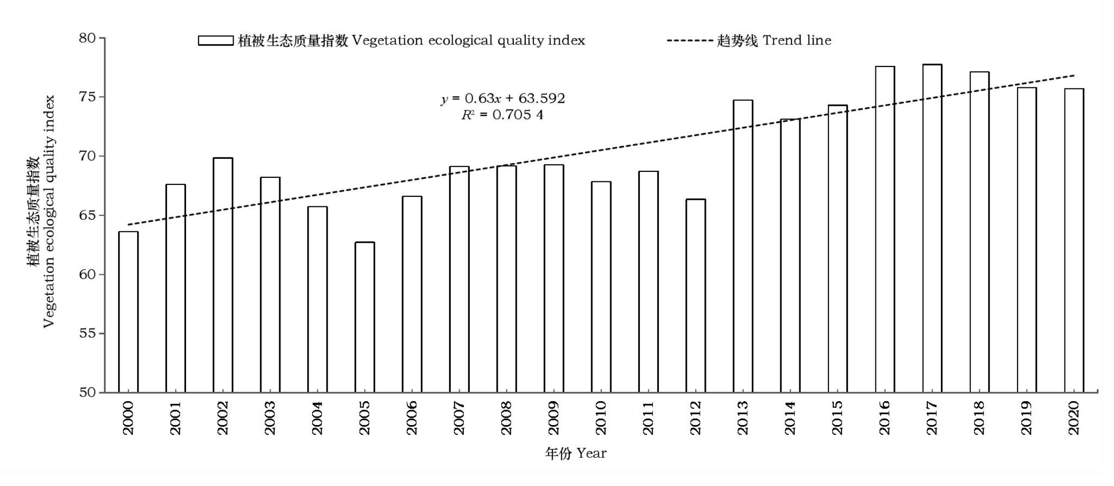
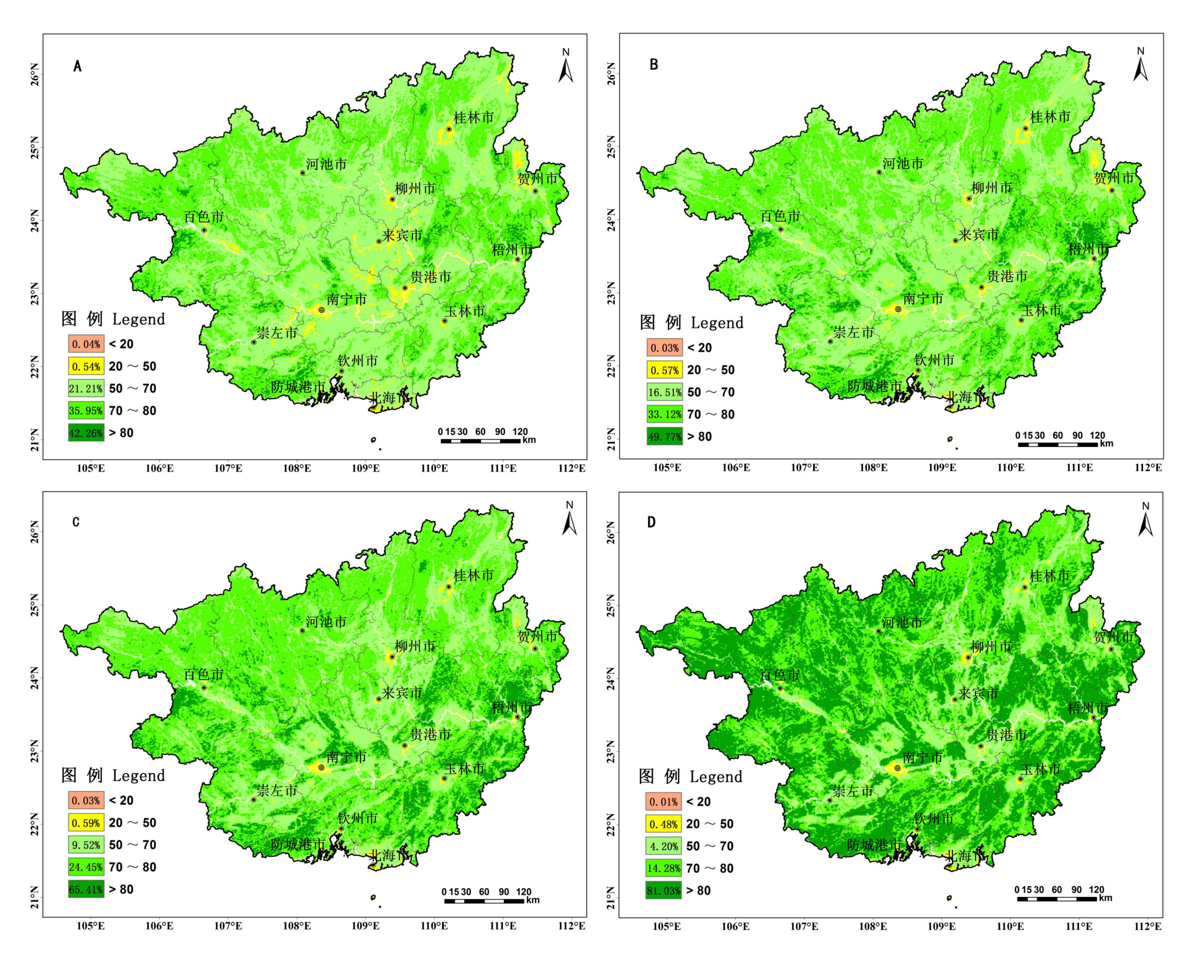


图 1 2000—2020 年广西植被生态质量指数变化图

Fig.1 Variation of Vegetation ecological Quality index in Guangxi from 2000 to 2020

2.1.2 空间变化特征

2000—2020 年广西年植被生态质量空间分异明显（图 2）。2000 年以来，广西年均植被生态质量指数呈现四周高，中间低的特征，高值区逐渐由东部、南部向西部、北部扩展。2000—2005 年、2006—2010 年两个时段空间分布格局相似，分别有 78.21%、82.89%区域植被生态质量指数为高值区（大于 70），主要分布在东部的梧州市，南部的防城港市。2011—2015 年，广西植被生态质量继续改善，高值区扩展至玉林市、钦州市、崇左市，占比为 89.86%。2016—2020 年广西植被生态质量提升明显，高值区扩展至百色市、河池市，占比为 95.31%，大部分植被生态质量总体趋向好的态势发展。



A. 2000—2005；**B**. 2006—2010；**C**. 2011—2015；**D**. 2016—2020。

图 2 2000—2020 年各时段广西植被生态质量空间变异分布图

Fig.2 Distribution of spatial variation of vegetation ecological quality in Guangxi in each period from 2000 to 2020

2.1.3 时空变化趋势

基于广西植被生态质量指数，以 2000 年为基准，计算 2000—2020 年广西植被生态植被变化趋势率（Slope）。利用自然断点法，结合植被生态改善的实际情况，将 Slope 划分为明显变差（Slope≤-1.0）、变差（-1.0＜Slope≤-0.5）、略变差（-0.5＜Slope≤0.0）、略变好（0.0＜Slope≤0.5）、变好（0.5＜Slope≤1.0）、明显变好（Slope＞1.0）等 6 个等级，并利用 F 检验法对 Slope 进行显著性检验（图 3）。2000—2020 年广西总体有 98.83% 的区植被生态质量呈变好趋势，88.71%区域通过显著性增加检验，植被生态改善显著，主要分布在来宾市中南部、南宁市南部、钦州市中南部；仅有 1.17% 的区域植被生态质量呈下降趋势，0.45%区域通过显著性减少检验，主要分布在南宁市、柳州市、梧州市、玉林市等城镇开发区。

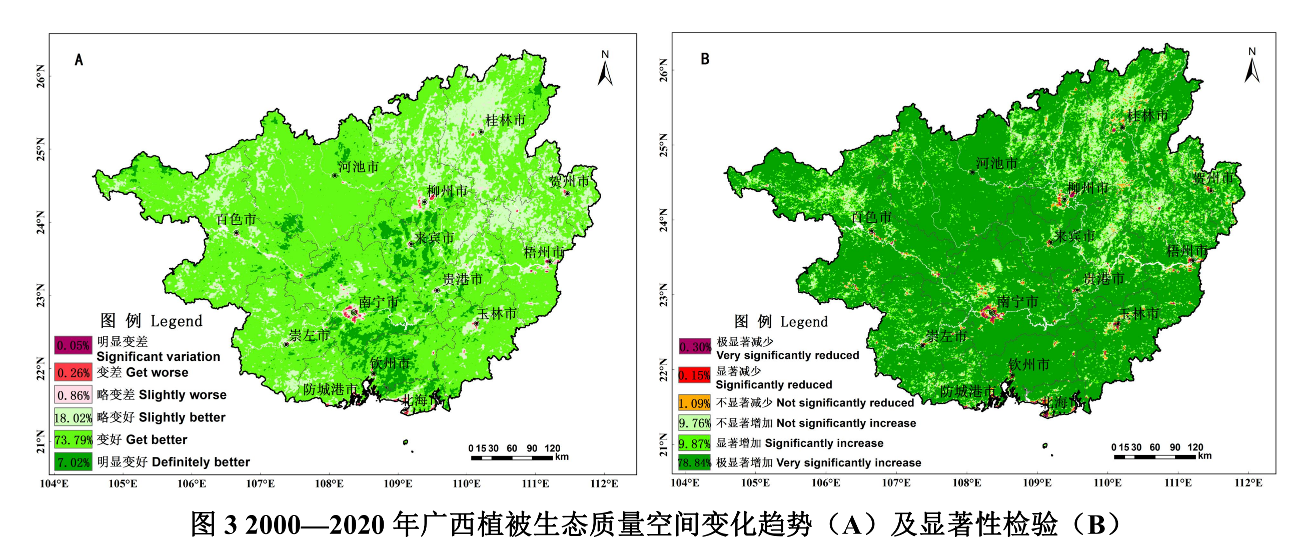


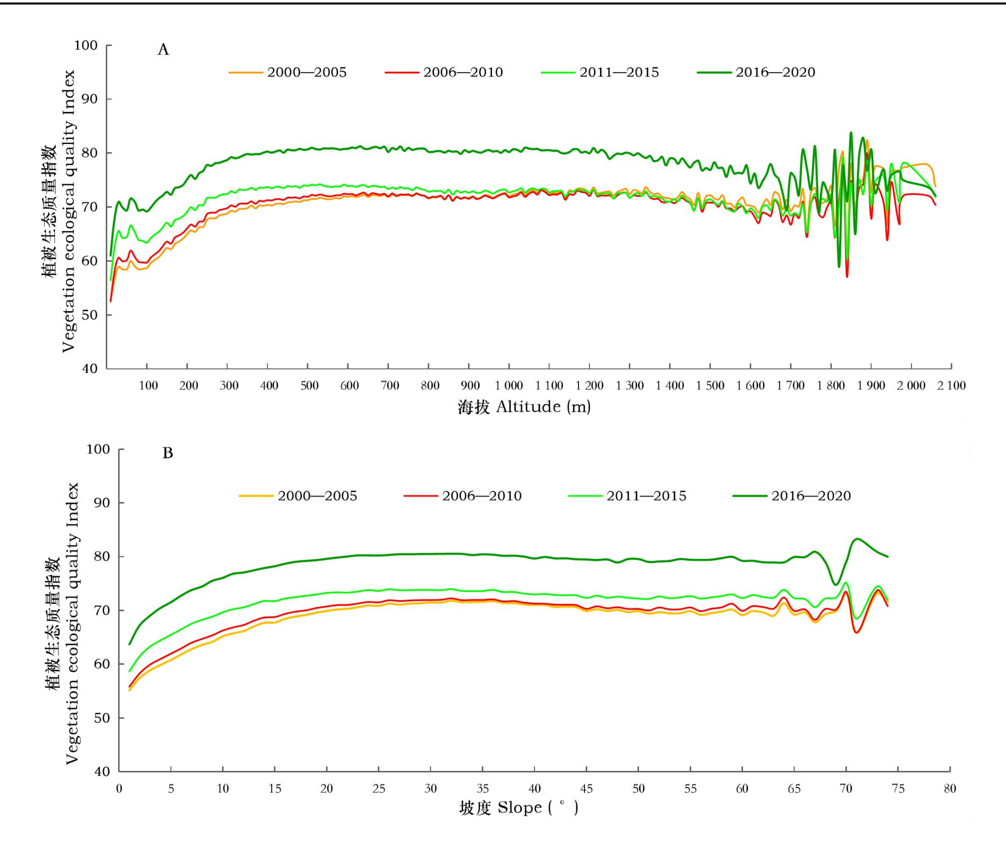
图 3 2000—2020 年广西植被生态质量空间变化趋势（A）及显著性检验（B）

Fig.3 Spatial variation trend(**A**) and significance test(**B**) of vegetation ecological quality in Guangxi during 2000 to 2020

2.2 广西植被生态质量变化驱动因素分析

2.2.1 地形对植被生态质量的影响

2000—2020 年不同时段广西年均植被生态质量指数随地形环境的变化趋势如图 4 所示。从海拔可以看出，0 m 至 200 m，广西年均植被生态质量指数随着海拔增加上升速度最快；200 m 至 400 m，随着海拔增加呈现缓慢上升趋势；400 m 至 800 m，随着海拔增加呈现降低趋势；800 m 至 1 200 m，随着海拔的上升几乎保持不变的趋势；1 200 m 至 1 600 m，随着海拔的上升呈现缓慢下降趋势；1 600 m 至 2 000 m，随着海拔的上升呈现出现较强的上下升波动趋势。从坡度可以看出，0°至 15°，植被生态质量随着坡度的上升而增加的趋势明显；15°至 25°，随着坡度的上升呈现缓慢趋势；25°至 45°，随着坡度的上升呈现略下降趋势；45°至 60°随着坡度的上升呈现几乎保持不变的趋势；60°至 80°，随着坡度的上升出现"上升—下降—上升"波动趋势。从不同时段可以看出，在海拔 0～800 m、坡度 0°至 25°范围内，四个时段广西植被生态质量均逐步提升，但在 1 200～1 600 m 海拔范围内，2006—2010、2011—2015 两时段较 2000—2005 时段的植被生态质量指数降低，可能与复杂地形和自然灾害有关；2016—2020 时段全区不同地形环境下植被生态质量均得到了大幅度的提升。



A. 海拔；**B**. 坡度。

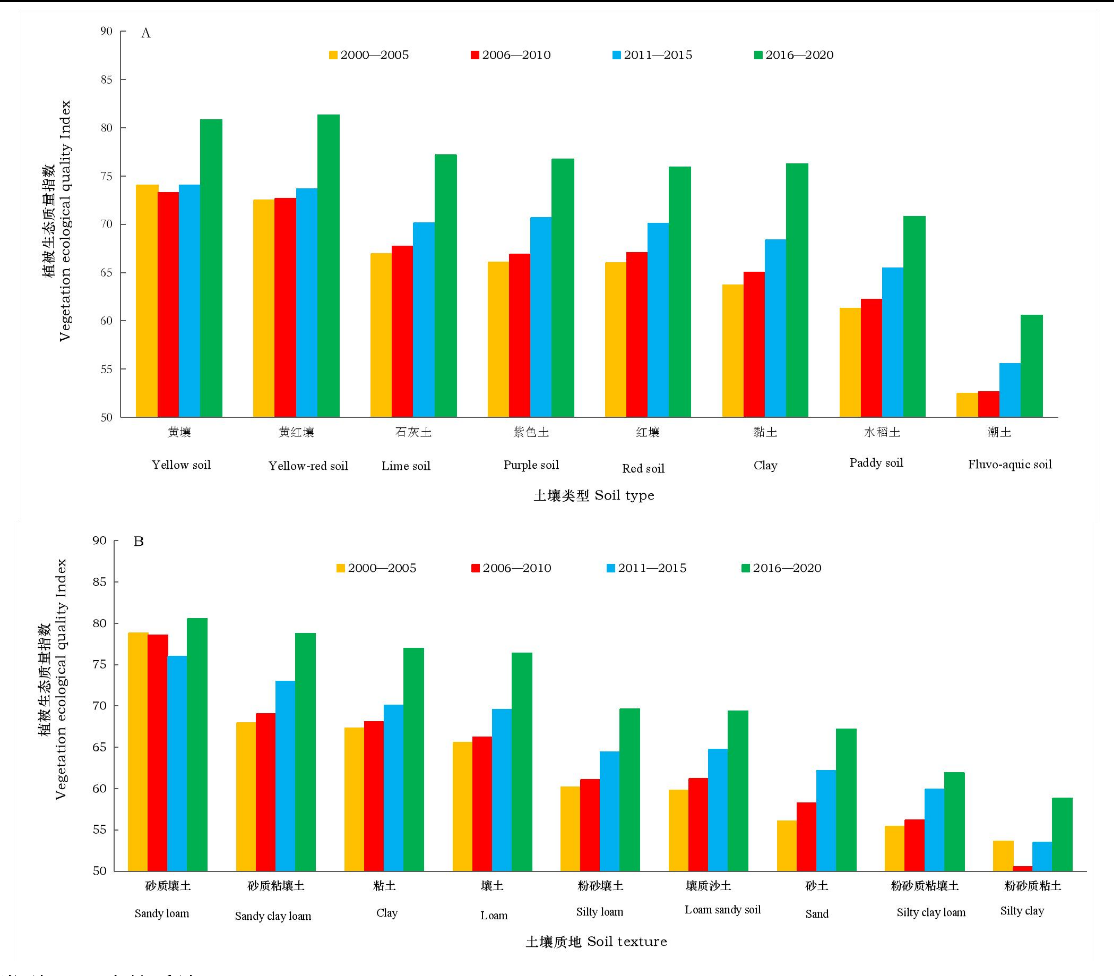
A. Altitude；**B**. Slope.

图 4 2000—2020 年不同时段广西植被生态质量指数随地形变化趋势图

Fig.4 Variation trend of vegetation ecological quality index with topography in Guangxi in different periods from 2000 to 2020

2.2.2 土壤对植被生态质量的影响

2000—2020 年不同时段广西年均植被生态质量指数随土壤环境的变化趋势如图 5 所示。对于不同土壤类型而言，广西黄壤的平均植被生态质量指数最高，为 75.6，其次是黄红壤，为 75.0，石灰土和紫色土基本相同，为 70.1，潮土、水稻土较低，分别为 64.9、55.3。对于不同土壤质地而言，广西平均植被生态质量指数壤土最高，平均为 68.5，其次是粘土，平均为 65.1，砂土最低，平均为 62.4。对于不同时段而言，除砂质壤土、粉砂质粘土 2006—2010 时段较 2000—2005 时段植被生态质量指数有下降趋势，其余土壤质地类型均呈现上升趋势；2016—2020 时段全区域土壤质地植被生态质量均得到了大幅度的提升。



A. 土壤类型；**B**. 土壤质地。

A. Soil type; **B**. Soil texture.

图 5 2000—2020 年不同时段广西植被生态质量指数随土壤环境变化趋势图

Fig.5 Variation trend of vegetation ecological quality index with soil environment in Guangxi in different periods from 2000 to 2020

2.2.3 植被类型对植被生态质量的影响

利用 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年广西植被类型信息，分别统计 2000—2005 年、2006—2010 年、2011—2015 年、2016—2020 年广西植被类型动态度及其生态质量指数平均值（表 1）。结果表明，广西森林、灌草、农田植被动态变化及其生态质量差异明显。从植被动态变化看：2000—2020 年 4 个时段森林、灌草的动态度均大于 0，其中，森林的动态度最大，4 个时段的年平均增长率为 1.30%，是广西植被面积演变的主导因子，灌草的动态度次之，年平均增长率为 0.56%，呈现逐年增长趋势；农田植被的动态度均小于 0，呈减少趋势，年平均减少率为 2.64%，且在 2010 年以后减少最为剧烈。从不同植被类型植被生态质量看：森林平均植被生态质量较好，为 74.38，灌草次之，为 72.19，农田植被最低，为 64.93。从不同时间段看：2000—2010 年广西农田植被生态质量指数年均增速最快，森林次之，灌草较慢；2011—2020 年，森林植被生态质量指数年均增速最快，灌草次之，农田较慢（图 6）。

表 1 2000—2020 年广西不同植被类型植被生态质量指数(EQI)变化

Table 1 Variation of vegetation ecological quality index(EQI) of different vegetation types in Guangxi from 2000 to 2020

植被类型 Vegetation type	2000—2005		2006—2010		2011—2015		2016—2020	
	动态度 Dynamic attitude (%)	均值 Mean	动态度 Dynamic attitude (%)	均值 Mean	动态度 Dynamic attitude (%)	均值 Mean	动态度 Dynamic attitude (%)	均值 Mean

森林 Forest	1.20	70.76	2.46	71.77	0.65	74.89	0.88	80.11
灌草 Thickets and grass	0.17	68.16	0.32	70.02	0.74	72.97	0.99	77.59
农田 Farmland	-1.50	60.68	-3.47	63.11	-3.11	65.24	-2.49	70.69

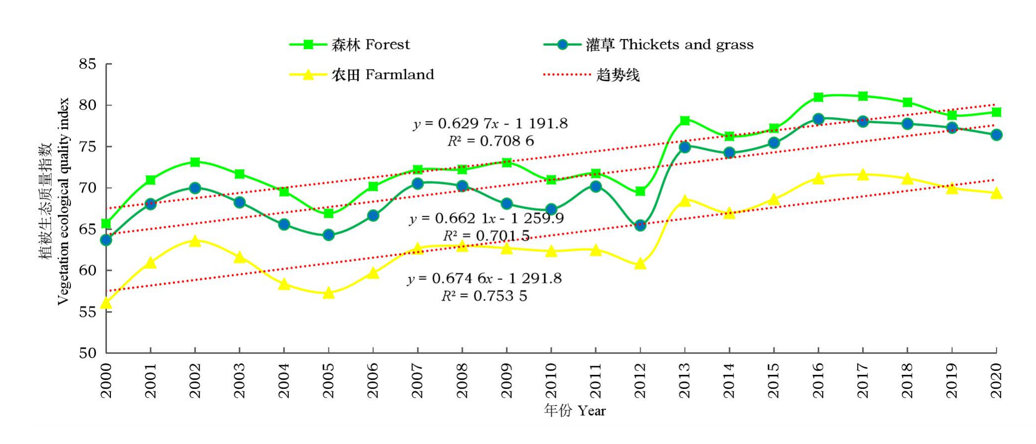


图 6 2000—2020 年广西不同植被类型植被生态质量指数变化图

Fig.6 Variation of vegetation ecological quality index of different vegetation types in Guangxi from 2000 to 2020

2.2.4 气候对植被生态质量变化的影响

2000—2020 年广西年均气温的变化范围为 20.25～21.77 ℃，多年均值为 20.96 ℃，呈现上升趋势；年降水量的变化范围为 1 224.05～1 920.32 mm，多年均值为 1 547.51 mm，呈现上升趋势（图 7）。广西气温、降水量变化与植被生态质量指数的正相关特征明显（图 8）。气温与植被生态质量指数的偏相关系数为-0.69～0.92，平均值为 0.32。正、负相关区域分别占总面积的 94.26%、5.74%。其中显著正相关区域占比为 39.90%，主要分布在桂东北的桂林市、柳州市、河池市的东部和西部，桂西北百色市北部，桂南钦州市东北部、防城港市东部，桂中来宾市东北部；显著负相关区域仅占 0.24%，主要分布在梧州南部。降水量与植被生态质量指数的偏相关系数为-0.64～0.89，平均值为 0.34。正、负相关的区域分别占总面积的 96.57%、3.43%。其中显著正相关区域占比为 44.38%，主要分布在百色市东南部和西北部，崇左市、南宁市、梧州市大部，河池市东南部，桂林市东南部和东北部，贺州市北部，钦州市东北部。显著负相关区域仅占 0.04%。气温降水量与植被生态质量指数的复相关系数为 0.00～0.92，平均值为 0.49。复相关性较强区域（系数大于 0.4）较大，占总面积的 73.19%，显著区域占比为 44.14%，主要分布柳州市东北部、河池市东部、桂林市西南部，百色市西北部和东南部，崇左市西部，南宁市西北部，钦州市东部，梧州市中部。其余大部分为不显著区域，占比为 55.86%。

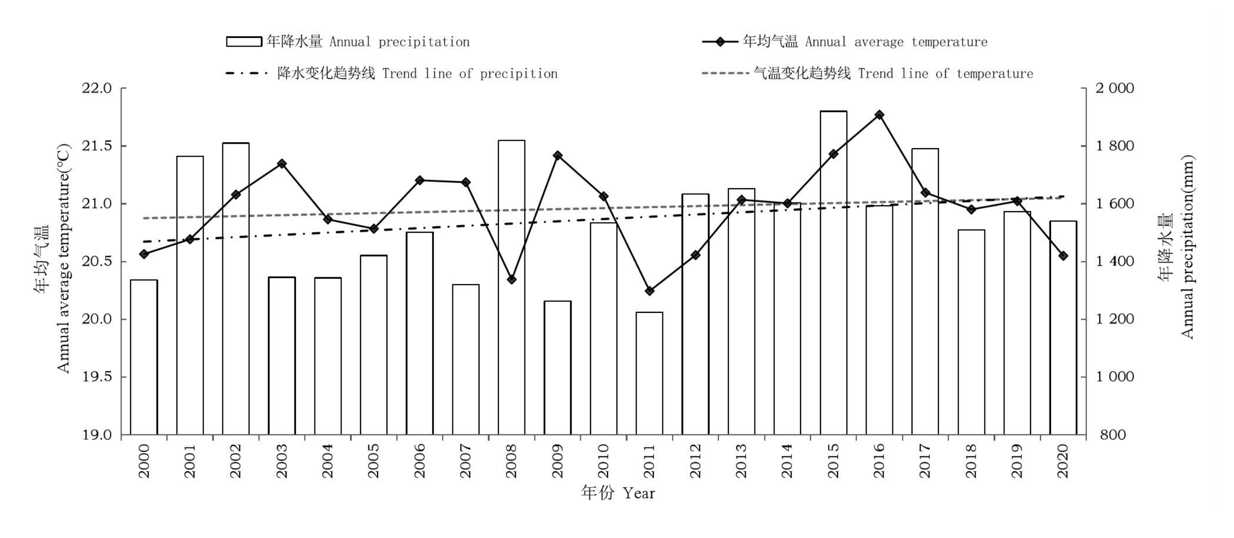
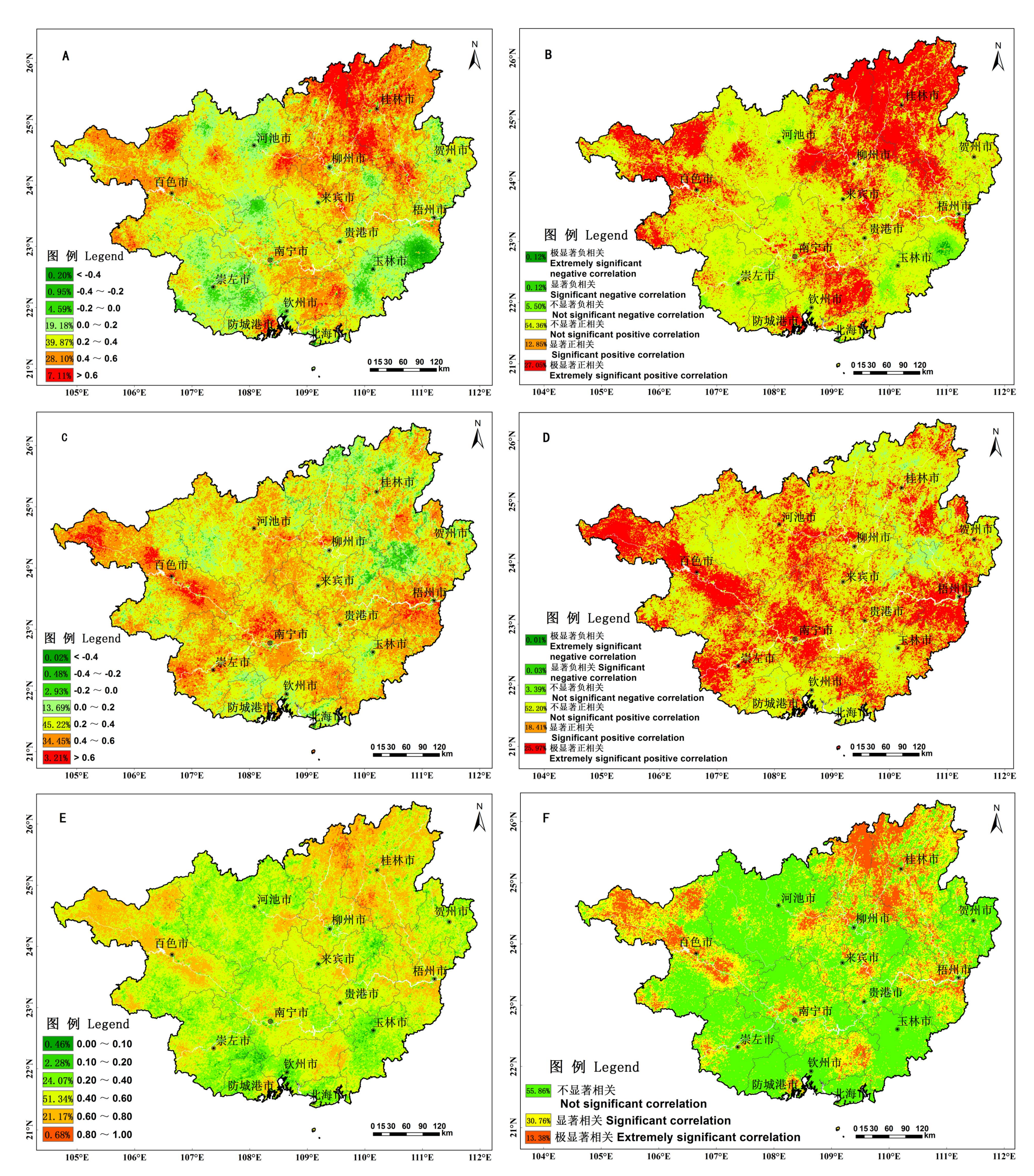


图 7 2000—2020 年广西年均气温、年降水量变化趋势图

Fig.7 Variation trend of annual average temperature and annual precipitation in Guangxi from 2000 to 2020



A. 气温偏相关；**B**. 气温偏相关显著性；**C**. 降水量偏相关；**D**. 降水量偏相关显著性；**E**. 气温降水量复相关；**F**. 气温降水量复相关显著性。

A. Partial correlation with temperature; **B**. Significance of partial correlation with temperature; **C**. Partial correlation with precipitation; **D**. Significance of partial correlation with precipitation; **E**. Complex correlation with temperature and precipitation; **F**. Significance of complex correlation with temperature and precipitation.

图 8 广西植被生态质量与气候相关及其显著性空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of correlation between vegetation ecological quality and climate and its significance in Guangxi

基于广西植被生态质量变化与各气候因子的相关性及其显著性检验，采用植被定量因子变化的驱动分

区方法，构建广西植被生态质量演变气候驱动因素分区指标（表 2）。气温降水强驱动($[T+P]^{+}$)：R_1 和 R_2 均满足 $|t|>t_{0.01}$，且 R_3 满足 $F>F_{0.05}$；气温为主要驱动（T）：R_1 满足 $|t|>t_{0.01}$，且 R_3 满足 $F>F_{0.05}$；降水为主要驱动（P）：R_2 满足 $|t|>t_{0.01}$，且 R_3 满足 $F>F_{0.05}$；气温降水弱驱动（$[T+P]^{-}$）：R_1 和 R_2 均满足 $|t|\leq t_{0.01}$，且 R_3 满足 $F>F_{0.05}$；非气候驱动（NC）：R_3 满足 $F\leq F_{0.05}$。

表 2 广西植被生态质量变化气候驱动分区指标

Table 2 Climate-driven zoning index of vegetation ecological quality change in Guangxi

变化驱动因素 Changes driving factor		分区指标 Zoning indicator R_1	R_2	R_3
气候因子 Climate factor	$[T+P]^{+}$	$\|t\|>t_{0.01}$	$\|t\|>t_{0.01}$	$F>F_{0.05}$
	T	$\|t\|>t_{0.01}$		$F>F_{0.05}$
	P		$\|t\|>t_{0.01}$	$F>F_{0.05}$
	$[T+P]^{-}$	$\|t\|\leq t_{0.01}$	$\|t\|\leq t_{0.01}$	$F>F_{0.05}$
非气候因子 Not-Climate factor	NC			$F\leq F_{0.05}$

注：R_1 为植被生态质量与气温偏相关的 T 显著性检验；R_2 为植被生态质量与降水偏相关的 T 显著性检验；R_3 为植被生态质量与气温、降水复相关的 F 显著性检验。

Note: R_1 is the T-significance test of the partial correlation between vegetation ecological quality and temperature；R_2 is the T-significance test of the partial correlation between vegetation ecological quality and precipitation；R_3 is the F-significance test of the compound correlation between vegetation ecological quality and temperature and precipitation.

根据驱动力分区指标，利用 GIS 技术，划分广西植被生态质量演变驱动力分区（图 9）。2000—2020 年广西植被生态质量演变驱动力主要分为气候驱动力与非气候驱动力，占比分别为 44.14%、55.86%。气候驱动力以气温为主要驱动（T）的区域面积最大，占比为 17.86%，主要分布在柳州市三江县、柳江区、融水县，桂林市大部，百色市乐业县，贺州市昭平县，该地区地处云贵高原边缘山地地区，降水充沛，年均降水为 1 633.2 mm，高于全区年均降水量 5.54%，但地形复杂，平均海拔为 472.1 m，平均坡度为 20.7°，因此植被生态质量变化对气温较为敏感。降水为主要驱动（P）的区域面积次之，占比为 13.64%，主要集中在百色市隆林县、西林县、田东县、田阳县，崇左市龙州县，南宁市武鸣区，贺州市富川县，桂林市平乐县，梧州市藤县、苍梧县，该地区地处广西丘陵地区，平均海拔为 365.2 m，平均坡度为 18.7°，热量充足，年均气温为 21.3℃，但该地年均降水量相对较少，为 1 422.9 mm，低于全区年均降水量 8.05%，气象干旱风险较大，因此植被生态质量变化对降水量较为敏感。气温降水强驱动（$[T+P]^{+}$）和气温降水弱驱动（$[T+P]^{-}$）的区域面积较小，占比分别为 7.59%、5.05%，气候条件均介于 T 型和 P 型之间，空间分布上，$[T+P]^{+}$型主要集中在河池市宜州区，柳州市柳江区、柳城县，桂林市恭城县、平乐县、全州县，百色市隆林县、田林县，来宾市武宣县，钦州市浦北县，梧州市龙圩区；$[T+P]^{-}$型零散分布在柳州市融安县、来宾市兴宾区。其余大部分地区属于非气候驱动（NC）的区域，该地区大部分属于喀斯特地貌，地形复杂，植被以灌木、灌丛为主，土壤以石灰土为主，土层薄，土地贫瘠，石漠化严重，易受自然灾害的影响，是广西生态恢复治理重点关注区域。

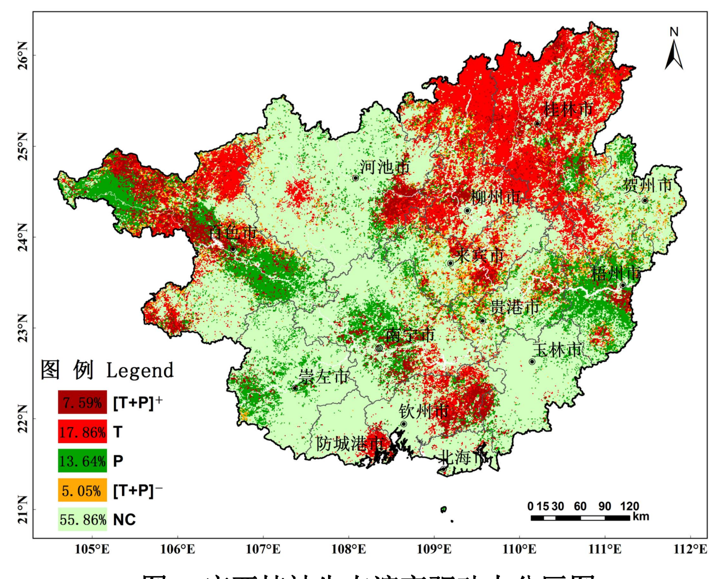


图 9 广西植被生态演变驱动力分区图

Fig.9 Distribution of driving forces of vegetation ecological change in Guangxi

2.3 广西植被生态质量变化驱动力分析

基于广西植被生态质量变化的驱动因素分析，利用数据离散化方法，将地形、土壤、植被、气候因子进行分类，其中地形因子，选择高程（X_1）按照＜200 m、200~400 m、400~800 m、800~1 200 m、1 200~1 600 m、＞1 600 m 分 6 类，坡度（X_2）按照＜15°、15°~25°、25°~45°、45°~60°、＞60°分为 5 类；土壤因子，选择土壤类型（X_3）按照黄壤、红壤、黄红壤、黏土、石灰土、紫色土、潮土、水稻土分为 8 类，土壤质地（X_4）按照砂质壤土、砂质粘壤土、粘土、壤土、粉砂壤土、壤质沙土、砂土、粉砂质粘壤土、粉砂质粘土分为 9 类；植被因子，选择植被类型（X_5）按照森林、灌草、农田、其他分为 4 类，年均植被覆盖度（X_6）按照＜30%、30%~45%、45%~60%、60%~75%、＞75%分为 5 类，年均植被净初级生产力（X_7）按照＜600 gC·m^{-2}、600~800 gC·m^{-2}、800~1 000 gC·m^{-2}、1 000~1 200 gC·m^{-2}、＞1 200 gC·m^{-2} 分为 5 类；气候因子，选择年均降水量（X_8）按照＜1 200 mm、1 200~1 400 mm、1 400~1 600 mm、1 600~1 800 mm、1 800~2 000 mm、＞2 000 mm 分为 6 类，年均气温（X_9）按照＜19 ℃、19~20 ℃、20~21 ℃、21~22 ℃、＞22 ℃分为 5 类。以年均植被生态质量指数为因变量，地形、土壤、植被、气候等因子为自变量，利用 ArcGIS 的渔网点工具生成等间距（0.025°）的采样点，并对因变量及各自变量的栅格数据进行信息提取，采用地理探测器分析 2000—2020 年各阶段广西植生态质量变化驱动机制。

2.3.1 单因子驱动力探测结果

广西植被生态质量变化单因子探测结果表明（表 3），各驱动因子对广西植被生态质量时空分布的影响程度有明显差异。各生态环境因素对应的平均 q 值大小排序为植被＞地形＞土壤＞气候。从单影响因子解释力的角度来看，年均植被净初级生产力和植被覆盖度的解释力均在 70%以上，是影响广西植被生态质量时空分异的最主要因素；高程、坡度、植被类型的解释力在 20%~60%之间，是影响广西植被生态质量时空分异的次要因素；土壤类型、土壤质地、年均降水量和气温的解释力均小于 10%，对广西植被生态质量的空间分异特征影响较小。从分时间段来看，2000—2020 年广西植被生态质量变化的地形、土壤、气候单影响因子 q 值均呈下降趋势，而植被单影响因子呈上升趋势，表明地形、土壤、气候单影响因子对植被生态质量空间分布的解释力逐步减弱，而植被单影响因子的解释力逐步增强。

表 3 单影响因子 q 值

Table 3 q values of single impact factor

时段	地形 Terrain		土壤 Soil		植被 Vegetation			气候 Climate	
Period	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X
2000—2005	0.350 8	0.532 5	0.070 6	0.047 5	0.188 5	0.765 2	0.814 4	0.016 2	0.037 5
2006—2010	0.251 1	0.472 0	0.065 5	0.046 0	0.249 1	0.769 8	0.827 4	0.014 7	0.014 8

2011—2015	0.221 8	0.444 6	0.052 8	0.049 2	0.254 0	0.772 4	0.851 5	0.009 0	0.007 1
2016—2020	0.246 5	0.465 7	0.055 4	0.048 1	0.291 7	0.806 0	0.895 6	0.011 0	0.014 1
平均 Average	0.267 6	0.478 7	0.061 1	0.047 7	0.245 8	0.778 3	0.847 2	0.012 7	0.018 4

2.3.2 因子交互作用探测结果

广西植被生态质量变化因子交互作用探测结果表明（表 4），广西植被生态质量时空分异特征的形成并非只受单一因子影响，而是各因子共同作用的结果；各影响因子间的交互作用对广西植被生态质量的影响呈非线性增强及双因子增强关系，不存在相互独立或减弱的情况。从不同类型因子的解释力而言，地形与植被、土壤与植被、气候与植被因子交互作用最明显，平均解释力达 60%以上，其中坡度与植被净初级生产力（q=0.884 3）、高程与植被净初级生产力（q=0.875 0）、气温与植被净初级生产力（q=0.861 1）、土壤类型与植被净初级生产力（q=0.852 3）、土壤质地与植被净初级生产力（q=0.852 0）、降水量与植被净初级生产力（q=0.851 6）、土壤类型与植被覆盖度（q=0.804 9）的交互作用最强，平均解释力达 80%以上；高程与植被覆盖度（q=0.789 1）、气温与植被覆盖度（q=0.786 1）、土壤类型与植被覆盖度（q=0.784 9）、土壤质地与植被覆盖度（q=0.784 8）、降水量与植被覆盖度（q=0.782 8）的交互作用次之，平均解释力为 60%~80%；土壤类型与降水量（q=0.095 5）、土壤类型与气温（q=0.093 5）、土壤质地与气温（q=0.083 6）、土壤质地与降水量（q=0.069 2）的交互作用最弱，解释力小于 10%。从同类型因子的解释力而言，植被因子交互作用较明显，其中植被覆盖度与植被净初级生产力（q=0.928 8）、植被类型与植被净初级生产力（q=0.863 2）、植被类型与植被覆盖度（q=0.791 7）的交互作用最强，平均解释力达 70%以上；高程与坡度（q=0.483 9）、土壤类型与土壤质地（q=0.118 0）的交互作用次之，平均解释力为 10%~50%；降水量与气温（q=0.072 2）的交互作用最弱，平均解释力小于 10%。

表 4 影响因子交互作用 *q* 值

Table4 *q* values of interaction factors

影响因子 Impact factor	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
X_1	0.267 6								
X_2	0.483 9	0.478 7							
X_3	0.313 4	0.515 7	0.061 1						
X_4	0.363 3*	0.523 1	0.118 0*	0.047 7					
X_5	0.418 9	0.564 0	0.289 1	0.281 9	0.245 8				
X_6	0.789 1	0.804 9	0.784 9	0.784 8	0.791 7	0.778 3			
X_7	0.875 0	0.884 3	0.852 3	0.852 0	0.863 2	0.928 8	0.847 2		
X_8	0.320 5*	0.515 4*	0.095 5*	0.069 2*	0.266 4*	0.782 8	0.851 6	0.012 7	
X_9	0.335 6*	0.518 9*	0.093 7*	0.083 6*	0.268 8*	0.786 1	0.861 1	0.072 2*	0.018 4

注：*代表非线性增强关系；无*代表双因子增强关系。

Note：* represents a non-linear enhancement relationship；no * represents a two-factor enhancement relationship.

3 讨论

基于不同评价指标的植被生态质量时空变化特征存在差异。本研究选择基于植被覆盖度和净初级生产力共同构建的 EQI 为评价指标，研究结果表明，2000—2020 年广西植被生态质量指数波动增加，植被生态明显改善，这与全国尺度以植被综合生态质量指数 QI（钱栓，2020）为指标的评估结果相符。与单独以植被 NPP 为评价指标的评估结果不相符（周爱萍等，2014；荣检等，2017；熊小菊等，2019）。主要原因是本研究依据植被生态学原理，不但采用了决定植被分布与量度内在与外在原因的植被生产力表征，还采用了植被对自然生态过程或生态平衡所做出的以经济贡献作为评价指标的植被覆盖度表征，以此构建的植被综合生态质量模型分析植被生态质量时空分布特征，结果较单因子评价客观全面。此外，本研究结果显示，广西植被生态质量改善存在较大的空间异质性，EQI 呈现四周高，中间低的特征，这与研究区植被覆盖度（王永锋等，2017；杨艳萍等，2021）、植被 NPP（荣检等，2017；熊小菊等，2019）分布格局基本

一致，主要原因是与广西地形呈周高中低、形似盆地特征有密切相关。EQI 以植被覆盖度指标表征植被生态功能，植被 NPP 表征植被生产功能，两者的权重系数可以根据研究地区及植被类型进行调整，这对于气候梯度、植被生态系统类型地域差异明显的中国不同地区具有很好的适用性，但植被覆盖度和植被 NPP 的两者权重等参数本地化需深入研究。

植被生态质量受到气象灾害和人类活动影响显著。干旱、洪涝及极端气温变化等极端气象灾害会降低森林覆盖率和森林质量（王剑波等，2012），如 2008 年低温雨雪冰冻灾害导致广西大量林木被损毁，生态环境受到严重影响（王祝雄等，2008）。本研究发现 2000—2010 年广西植被 EQI 较低，可能原因是在这期间 2004、2005、2006、2009 年广西区域旱情严重（陈燕丽等，2019），导致植被绿度和生产力降低，影响植被生态质量，因此研究结果与实际灾情相符。此外，人类活动对植被 EQI 的影响也不可忽视。自 1999 年以来，国家实施多项退耕还林和石漠化治理工程，增加对林草植被保护的投入（马华等，2014），以林业生态建设为中心的石漠化治理工程对减少石漠化起到了显著效果，2012 年广西石漠化减少面积在全国 8 个石漠化省区中最多，全区森林覆盖率达 61.4%，跃居全国第三（黄文华等，2013）。可见，人类活动增加了植被覆盖度、提升了植被生产力，进而改善了植被生态质量。本研究也发现森林和灌草动态度大于 0，面积递增，而农田植被动态度小于 0，面积减少，2013 年广西植被 EQI 开始跳跃式增长，植被生态明显改善。这说明广西森林和灌草面积增加，农田面积减少；植被类型之间均存在相互转移变化。联系实际，植被类型变化转移原因可能与国家石漠化治理“退耕还林还草”政策、城市化进程建设项目占用或非农活动导致耕地减少、农村劳动人口外出务工导致耕地丢荒等原因有关。本研究对 2000—2020 年广西各阶段植被生态变化的因子驱动力进行探测，结果也表明地形、土壤、气候影响因子对植被生态质量时空分异的解释力逐步减弱，而植被影响因子的解释力逐步增强，说明人类活动降低了地形、土壤、气候对植被生态质量空间分异的影响。因此，未来广西生态环境保护应着重考虑自然灾害、人类活动对植被的影响，同时也应考虑多种自然因子之间的协同作用，从多视角、多维度探究各因子对植被生态质量的影响，合理制定植被生态保护与修复措施。

地形、土壤、植被、气候对植被生态的影响存在较大的空间差异。对于地形而言，其涵盖了高程、坡度等多维变量，通过水热和土壤条件影响植被生长（邓元杰，2020）。本研究发现，在高程＜400 m、坡度＜25°区域，EQI 较低且波动性强，可能原因是该区域为人类活动密集区人类活动较多，同时由于该区域为平原和丘陵过渡地带，植被类型不稳定，农田向灌草、森林转变频率较高，因而 EQI 变化较明显，杨艳萍等（2021）对广西地区植被 NDVI 随地形变化特征的研究中得出相似结论。在 1 600 m＜高程＜2 000 m、60°＜坡度＜80°区域，EQI 随高程和坡度波动性也较强，可能与该区域的地貌有关，该区域主要包括喀斯特和山地丘陵两种地貌类型，喀斯特地貌即岩溶石山区，植被以灌草、灌木为主，EQI 相对较低，山地丘陵以木本、藤本植物为主，EQI 相对较高。另外，该区域多为山峰顶端，坡度较大，多数植被附着力低，极易发生水土流失，导致 EQI 稳定性较差。土壤方面，由于结构、质地、肥力等方面的差异，不同土壤类型条件下植被的生长速度和长势不同。本研究发现壤土植被 EQI 较高，砂土植被 EQI 较低。已有研究也表明壤土通气透水、蓄水保肥，适宜植被生长，而砂土土温高、有机质不易积累、腐殖质含量低，不利于植被生长。气候方面，已经证实气温和降水等气象因子是植被生长的重要驱动力，但两者的响应规律则因研究时段、遥感参数和研究方法有一定的差异。对于广西地区植被，杨艳萍等（2021）研究发现在居民用地和未利用土地上植被对气温响应较剧烈，而在林地上植被对降水响应较剧烈，李燕丽等（2014）发现广西植被 NPP 与降水正相关，与温度相关性不显著，而荣检等（2017）认为年尺度上广西植被 NPP 与降水负相关，与气温正相关，熊小菊等（2019）提出广西植被 NPP 对气温降水变化响应不显著。说明不同植被类型受降水和温度的影响大小具有较大差异性（王永锋等，2017），两者的作用大小尚需深入研究（韦振锋等，2013；张敏等，2019）。本研究采用了偏相关方法分析两者的响应特征，发现广西植被 EQI 在气温和降水共同影响下具有较强空间异质性，EQI 与气温、降水均显著正相关，对于海拔较高、降水丰富的山地，植被 EQI 对气温响应更敏感，对于海拔较低、降水相对偏少的丘陵，植被 EQI 对降水对响应更敏感。可能原因是对于山地地区，若降水丰富，则提供了充足的水分来源，一定程度上消弱了降水对植被的直接效应，而由于海拔较高，温度变化较大，影响不同植被的光合作用，因而植被 EQI 对气温响应更敏感；对于丘陵地区，若热量充足，则提供了稳定的热量，一定程度上消弱了气温对植被的直接效应，而由于水分偏少，从而抑制不同植被的生长，因而植被 EQI 对降水响应更敏感。这与前人研究的在半湿润和湿润区，温度对

植被的影响要高于降水，而在半干旱区，降水对植被的影响要高于温度的结论基本一致（HUA et al.，2017；张顾萍等，2021）。

植被生态质量时空演变驱动力存在一定的耦合关系。本研究对广西植被 EQI 变化气候驱动力分区的结果表明，以气温、降水为主要驱动的区域面积较大，而单因子探测结果表明，气温和降水量对广西植被 EQI 的空间分异特征影响较小。因子交互作用探测结果进一步表明，与单一生态环境因子相比，气候与生态环境因子之间的协同作用增强了其对植被 EQI 时空分异的解释能力，气温、降水量与植被覆盖度、植被 NPP 的交互作用的解释力均超过 70%。已有相关研究也表明，植被与水热组合条件变化的响应与适应将对植被的生理生态过程、物质积累与分配以及生态系统的结构和功能产生巨大影响（Butler et al.，2012；吕晓敏等，2015）。同时，气温可以直接影响土壤温度，从而影响植物的水肥吸收和传输，进而影响植被的生长（康红梅等，2020）。但本研究发现气温、降水与土壤类型、土壤质地交互作用较弱，说明对于亚热带地区，较高的气温可能会导致土壤温度升高，不利于土壤对水肥吸收，抑制植被生长，弱化了对植被生态质量空间分异解释力。该结论与半湿润、半干旱地区的研究结果不同，对于该地区气温和土壤类型交互作用最强，适宜的气温利于土壤吸收养分，促进植被生长，增强了对植被生态质量空间分异解释力（王金杰等，2021）。

总体而言，2000 年以来，广西植被生态质量变化驱动力是地形、土壤、植被、气候、自然灾害和人类活动的共同驱动的结果。虽然目前地理探测器对影响因子的空间分区还没有明确的划分标准，但是本研究主要基于植被生态质量变化驱动因素分析的基础上进行因子的空间分区，因此，其因子解释力具有一定的客观性。同时，本研究仅从地形、土壤、植被、气候等方面定量分析了自然因子对广西植被生态质量时空分异的驱动机制，尚未研究出植被生态质量变化的气候影响率、气象灾害定损、人类活动贡献率定量化评价。进一步地，在此基础上，研究基于气象模型和生态模型，构建植被生态质量变化气象条件、气象灾害、人类活动贡献率评价技术方法，该方面有待深入研究。

4 结论

本文以生态质量指数为评价指标，分析了 2000—2020 年广西植被生态质量时空分布特征及其驱动力，得到以下结论：

（1）2000 年以来广西植被生态质量指数呈显著增加趋势，区域植被生态明显改善。植被生态质量发展经历了缓慢增长、迅速增长、显著提升等演变阶段。在空间上，广西植被生态质量指数呈现四周高，中间低的特征，高值区逐渐由东部向西部、北部扩展。

（2）广西植被生态质量时空演变影响因素差异显著。随着海拔高度的上升植被生态质量总体变化呈“增加—下降—不变—上下波动”的趋势。不同土壤类型的植被生态质量整体而言，壤土的植被生态质量高，砂土的植被生态质量低。不同植被类型的生态质量表现为，森林和灌草的动态度均大于 0，面积呈递增变化状态，生态质量较高；而农田植被的动态度小于 0，面积呈减少变化状态，生态质量较低。不同气候特征下的植被生态质量与气温、降水均呈显著正相关关系，受气温、降水共同影响，其中以气温为主要驱动的区域面积最广，降水为主要驱动的区域面积次之，气温降水强驱动和弱驱动的区域面积较小。

（3）广西植被生态质量变化驱动力受地形、土壤、植被、气候、自然灾害和人类活动的共同影响。自然影响因子解释力排序为植被＞地形＞土壤＞气候，其中植被净初级生产力和植被覆盖度是影响植被生态质量时空分异的最主要因素。自然因子对广西植被生态质量变化的影响存在交互作用，均呈非线性增强及双因子增强关系，其中地形与植被、土壤与植被、气候与植被因子交互作用最明显。自然灾害、人类活动加剧了植被生态质量变化的影响，其中干旱、低温冷害等气象灾害抑制了植被生态质量的改善，而林业生态工程等人为活动促进了植被生态质量的提升。

参考文献：

毕宝德，2006. 经济地理学[M]. 北京：中国人民大学出版社.[BI BD, 2006. Economic geography[M]. Beijing: Renmin University of China Press.]

曹云，孙应龙，陈紫璇，等，2022. 2000—2020年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应[J].生态学报，42(11): 4524-4535.[CAO Y, SUN YL, CHEN ZX, et al., 2022. Dynamic changes of vegetation ecological quality in the Yellow River Basin and itsresponse to extreme climate during 2000—2020[J]. Acta Ecol Sin, 42(11): 4524-4535.]

曹磊，2014. 江苏省植被NDVI动态变化及其与气候因子的关系[D]. 南京：南京农业大学.[CAO L, 2014. Spatiotemporal variation characteristics and impact factors of NDVI in Jiangsu Province[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University.]

陈燕丽，蒙良莉，黄肖寒，2019. 基于SPEI的广西喀斯特地区1971—2017 年干旱时空演变[J]. 干旱气象，37(3): 353-362. [CHEN YL, MENG LL, HUANG XH, 2019. Temporal and spatial distributions of drought in Guangxi karst area during 1971—2017 based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. J Arid Meteorol, 37(3): 353-362.]

陈燕丽，蒙良莉，黄肖寒，等，2019. 基于SPEI的广西甘蔗生育期干旱时空演变特征分析[J]. 农业工程学报，35(14)：149-158.[CHEN YL, MENG LL, HUANG XH, et al., 2019. Spatial and temporal evolution characteristics of drought in Guangxi during sugarcane growth period based on SPEI[J]. Transact Chin Soc Agric Engineer, 35(14)：149-158.]

戴芳筠，李柏贞，占明锦，等，2022. 2000—2021年江西省植被生态质量时空分布及其与气候因子的关系[J]. 气象与减灾研究，45(2):125-133.[DAI FY, LI BZ, ZHAN MJ, et al., 2022.S patirtemporal distribution of vegetation ecological quality and its relationship with climate factors in Jiangxi province from 2000 to 2021[J]. Meteorol Disaster Reduct Res, 45(2):125-133.]

邓元杰，姚顺波，侯孟阳，等，2020. 长江流域中上游植被NDVI时空变化及其地形分异效应[J]. 长江流域资源与环境，29(1)：66-78.[DENG YJ, YAO SB, HOU MY, et al., 2020. Temporal and spatial variation of vegetation NDVI and its topographic differentiation effect in the middle and upper reaches of the Yangtze river basin[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 29(1)：66-78.]

广西壮族自治区气候中心编著，2007. 广西气候[M]. 北京： 气象出版社.[Guangxi Climate Center Edited, 2007. The Climate of the Guangxi Zhuang Autonomous region[M]. Beijing: Meteorology Press.]

韩静，张国峰，李伟光，等，2022. 近20年海南岛植被生态质量变化特征分析[J]. 生态科学，41(1): 20-30.[HAN J, ZHANG GF, LI WG, et al., 2022. Analysis on the change characteristics of vegetation ecological quality in Hainan Island in recent 20 years[J]. Ecol Sci, 41(1): 20-30.]

黄冬梅，陈燕丽，莫建飞，等，2022. 广西典型地貌植被覆盖度随地形的变化特征[J]. 广西林业科学，51(5): 626-633.[HUANG DM, CHEN YL, MO JF, et al., 2022. Vegetation coverage change characteristics of typical landforms in Guangxi with topography[J]. Guangxi For Sci, 51(5):626-633.]

何鑫茹，2018. 广西植被覆盖度时空变化及影响因素分析[D]. 北京：中国地质大学.[HE XR, 2018. Analysis of spatial temporal evolution and influencial factors of vegetation coverage in Guangxi[D]. Beijing:China University of Geosciences.]

黄文华，刘家开，2013. 2012年广西林业10件大事及最具影响力的10项工作[J]. 广西林业，4: 7.[HUANG WH, LIU JK, 2013. 10 major events and 10 most influential tasks of Guangxi forestry in 2012[J]. Guangxi For, 4: 7.]

金凯，王飞，韩剑桥，等，2020. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报，75(5)：961-974.[JIN K, WANG F, HAN JQ, et al., 2020. Contribution of climatic change and human activities tovegetation NDVI change over China during1982－2015[J]. Acta Geograph Sin, 75(5)：961-97.4]

汲玉河，周广胜，王树东，等，2021. 2000-2019年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析[J].植物生态学报，45(06):617-625.[JI YH, ZHOU GS, WANG SD, et al., 2021. Evolution characteristics and its driving forces analysis of vegetation ecological quality in Qinling Mountains region from 2000 to 2019[J]. Chin J Plant Ecol, 45(6): 617-625.]

康红梅，李花花，徐当会，等，2020. 大气CO_2浓度及温度升高对高山灌木鬼箭锦鸡儿（*Caragana jubata*）生长及抗氧化系统的影响[J]. 生态学报，40(1)：367-376.[KANG HM, LI HH, XU DH, et al., 2020. Effects of elevated CO_2 and temperature on *Caragana jubata* (alpine shrub) growth and antioxidant systems [J]. Acta Ecol Sin, 40(1)：367-376.]

廖春贵，胡宝清，熊小菊，等，2018. 广西植被时空变化及其对气候响应[J]. 森林与环境学报，38(2): 178-184.[LIAO CG, HU BQ, XIONG XJ, et al., 2018. Spatial-temporal variation of vegetation and relations with climate change in Guangxi[J]. J For Environ, 38(2):178-184.]

刘刚，孙睿，肖志强，等，2017. 2001—2014年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系[J]. 生态学报，37(15): 4936-4945.[LIU G, SUN R, XIAO ZQ, et al., 2017. Analysis of spatial and temporal variation of net primary productivity and climate controls in China from 2001 to 2017[J]. Acta Ecol Sin, 37(15): 4936-4945.]

李燕丽，潘贤章，王昌昆，等，2014. 2000—2011年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 生态学报，34(18)：5220-5228.[LI YL, PAN XZ, WANG CK, et al., 2014. Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2011 in Guangxi, China[J]. Acta Ecol Sin, 34(18): 5220-5228.]

李同艳，2019. 西南地区植被覆盖度时空变化特征及其影响因素研究[D]. 昆明：云南大学.[LI TY, 2019. Spatio-temporal characteristics and influence factors of vegetation coverage in the southwest China[D]. Kunming:Yunnan University.]

吕晓敏，王玉辉，周广胜，等，2015. 温度与降水协同作用对短花针茅生物量及其分配的影响[J]. 生态学报，35(3)：752-760.[LÜ XM, WANG YH, ZHOU G S, et al., 2015. Interactive effects ofchanging precipitation and elevated temperatures on plant biomass andits allocation of *Stipa breviflora* [J]. Acta Ecol Sin, 35(3)：752-760.]

穆少杰，李建龙，陈奕兆，等，2012.2001-2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报，67(9):1255-1268.[MU SJ, LI JL, CHEN YZ, et al., 2012. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010[J]. Acta Geograph Sin,67(9): 1255-1268.]

马华，王云琦，王力，2014. 近20a广西石漠化区植被覆盖度与气候变化和农村经济发展的耦合关系[J]. 山地学报，32(1): 38-45.[MA H, WANG YQ, WANG L, 2014. Vegetation cover and climate change and rural economic development in relations during Last 20 Years in Karst region of Guangxi[J]. Mount Res, 32(1): 38-45.]

钱拴，延昊，吴门新，等，2020. 植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J]. 生态学报，40(18): 6573-6583.[QIAN S, YAN H, WU MX, et al., 2020. Dynamic monitoring and evaluation model for spatio-temporal change of comprehensive ecological quality of vegetation[J]. Acta Ecol Sin, 40(18): 6573-6583.]

荣检，胡宝清，闫妍，2017. 广西西江流域植被净初级生产力时空分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志，36(4): 1020-1028.[RONG J, HU BQ, YAN Y, 2017. Spatial-temporal distribution and its influencing factors of vegetation net primary productivity in Guangxi Xijiang River basin[J]. Chin J Ecol, 36(4):1020-1028.]

苏文豪，甘淑，袁希平，等，2018. 近30a思茅坝区植被覆盖度变化及其影响因素[J]. 河南大学学报(自然科学版)，48(5): 574-580.[SU WH, GAN S, YUAN XP, et al., 2018. Changes of vegetation coverage and its driving factors in SIMAO basin in recent 30 years[J]. J Henan Univ(Nat Sci), 48(5): 574-580.]

孙家抦，2003.遥感原理与应用[M]. 武汉：武汉大学出版社.[SUN JB, 2003. Principles and applications of remote sensing[M]. Wuhan: Wuhan University Press.]

王永锋，靖娟利. 广西近15a植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J]. 农业现代化研究，38(6): 1086-1096.WANG YF, JING JL, 2017. [Spatial-temporal variations of vegetation cover and its response to climate factors in Guangxi over the past 15 Years[J]. Res Agric Mod, 38(6): 1086-1096.]

韦振锋，任志远，张翀，2013. 近12年广西植被覆盖与降水和气温的时空响应特征[J]. 水土保持研究，20(5): 33-38.[WEI ZF, REN ZY, ZHANG C, 2013. Research on vegetation response to temperature and precipitation in Guangxi in rencent 12 years[J]. Res Soil Water Conserv, 20(5):33-38.]

王芳，汪左，张运，2018. 2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 生态学报，38(8): 2754-2767.[WANG F, WANG Z, ZHANG Y, 2018. Spatio-temporal variations in vegetation net

primary productivity and their driving factors in Anhui province from 2000 to 2015[J]. Acta Ecol Sin, 38(8): 2754-2767.[]

王剑波，吴柏海，曾以禹，2012. 林业与极端天气灾害：走基于生态系统的综合风险管理之路[J]. 林业经济，11: 24-29.[WANG JB, WU BH, ZENG YY, 2012.Forestry and natural disaster: Toward the ecosystem-based approaches for integrate risk management[J]. For Econ, 11：24-29.]

王祝雄，闫宏伟，莫沫，2008. 做好灾后调查评估科学组织灾后重建——广西壮族自治区灾后林业恢复重建调研报告[J]. 林业经济，4: 21-24.[WANG ZX, YAN HW, MO M, 2008. Do a good job in post-disaster assessment survey scientific organizations reconstruction—Research report on forestry restoration after Guangxi Zhuang Nature Reserve disaster[J]. For Econ, (4): 21-24.]

王劲峰，徐成东，2017. 地理探测器：原理与展望[J]. 地理学报，72(1)：116-134.[WANG JF, XU CD, 2017. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geograph Sin, 72(1)：116-134.]

王金杰，赵安周，胡小枫，2021. 京津冀植被净初级生产力时空分布及自然驱动因子分析[J]. 生态环境学报，30(6): 1158-1167.[WANG JJ, ZHAO AZ, HU XF, 2021. Spatiotemporal distribution of vegetation net primary productivity in Beijing-Tianjin-Hebei and natural driving factors[J]. Ecol Environ Sci, 30(6): 1158-1167.]

熊小菊，廖春贵，胡宝清，等，2019. 基于MODIS的广西植被NPP时空分异及驱动力分析[J].广西师范大学学报(自然科学版)，37(3):187-195.[XIONG XJ, LIAO CG, HU BQ, et al., 2019. Spatial and temporal variability in the net primary production and itsdriving factors base on MODIS data in Guangxi,China[J]. J Guangxi Norm Univ(Nat Sci Ed), 37(3): 187-195.]

徐勇，戴强玉，黄雯婷，等，2023. 2000—2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究[J]. 环境科学，44(1): 323-335.[XU Y, DAI QY, HUANG WT, et al., 2023. Spatio-temporal variation in vegetation cover and its driving mechanism exploration in Southwest China from 2000 to 2020[J]. Environ Sci, 44(1): 323-335.]

杨艳萍，陈建军，覃巧婷，等，2021. 2000-2018年广西植被时空变化及其对地形、气候和土地利用的响应[J]. 农业工程学报，37(17): 234-241.[YANG YP, CHEN JJ, QIN QT, et al., 2021. Temporal and spatial variation of vegetation and its response to topography, climate and land use in Guangxi during 2000-2018[J]. Transact Chin Soc Agric Engineer, 37(17): 234-241.]

赵英时，2003. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京：科学出版社.[ZHAO YS, 2003. The principle and method of remote sensing application and analysis[M]. Beijing: Science Press.]

张敏，曹春香，陈伟，2019. 基于MODIS NDVI数据的广西植被覆盖时空变化遥感诊断[J]. 林业科学，55(10):27-37.[ZHANG M, CAO CX, CHEN W, 2019. Remotely sensed diagnosing temporal and spatial

variation of vegetation coverage in Guangxi based on MODIS NDVI data[J]. Sci Silv Sin, 55(10): 27-37.]
周爱萍，向悟生，姚月锋，等，2014. 广西植被净初级生产力(NPP)时空演变及主要影响因素分析[J]. 广西植物，34(5): 622-628.[ZHOU AP, XIANG WS, YAO YF, et al., 2014. Analyzing variation characteristics of vegetation netprimary productivity(NPP) in Guangxi[J]. Guihaia, 34(5): 622-628.]
张月丛，赵志强，李双成，2008. 基于SPOT NDVI的华北北部地表植被覆盖变化趋势[J]. 地理研究，27(4):745-754.[ZHANG YC, ZHAO ZQ, LI SC, 2008. Indicating variation of surface vegetation cover using SPOT NDVI in the northern part of north China[J]. Geograph Res, 27 (4):745-754.]
张顾萍，陈国民，邵怀勇，等，2021. 近16年金沙江流域植被覆盖时空特征及其对气候的响应[J]. 长江流域资源与环境，30(7): 1638-1648.[ZHANG GP, CHEN GM, SHAO HY, et al., 2021. Analyzing variation characteristics of vegetation netprimary productivity(NPP) in Guangxi[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 30(7): 1638-1648.]
BUTLER S M,MELILLO J M,JOHNSON J E,et al., 2012.Soil warming alters nitrogen cycling in a New England forest: Implications forecosystem function and structure [J]. Oecologia,168(3): 819-828.
HUA W J, CHEN H S, ZHOU L M, et al., 2017.Observational quantification of climatic and Human influences on vegetation greening in China[J]. Remote Sensing, 9(5) : 425.
WANG JF, LI XH, CHRISTAKOS G, et al., 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. Internat J Geograph Inform Sci, 24(1): 107-127.
YAN H, WANG SQ, BILLESBACH D, 2015. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants[J]. Ecol Modll, 297: 42-59.